

# 地震検知能力の時間変化に関するベイズ推定

岩田 貴樹 リスク解析戦略研究センター 特任准教授

## 地震カタログの完全性：地震活動解析に与える影響

- 40年ほど前に「地震は**昼よりも夜に起きやすい**」という主張の論文が発表されたことがあります [Shimshoni, 1971, Geophys. J. R. astr. Soc.]
- その論文に記載されている、1968~1970年における全世界の地震の発生時刻の頻度分布(表1)を見ると、確かにそういう傾向が見てとれます
- しかし、その後、「地震活動の**日変化は見掛け上のもの**」とする論文が発表されます [Flinn et al., 1972, Geophys. J. R. astr. Soc.]
- 昼間は、人間の社会活動による**ノイズが大き**く、地震規模(マグニチュード、以下M)の小さな地震は検知されにくくなります(図1)
- 地震カタログの**完全性**を正しく**考慮しなかった**ゆえに、誤った結果を導いてしまった**典型的事例**の1つです
- 即ち、**地震検知能力の時間変化**を正確に評価することが、**地震活動解析において重要**となることを示しています

Earthquake frequencies by time of origin, 1968-1970

Time of origin	No. of events	Deviation from mean
23.30-00.30	725	86.5
00.30-01.30	725	86.5
01.30-02.30	685	46.5
02.30-03.30	625	-15.5
03.30-04.30	681	45.5
04.30-05.30	641	2.5
05.30-06.30	620	-18.5
06.30-07.30	599	-39.5
07.30-08.30	608	-30.5
08.30-09.30	620	-18.5
09.30-10.30	615	-23.5
10.30-11.30	586	-52.5
11.30-12.30	633	-15.5
12.30-13.30	600	-38.5
13.30-14.30	610	-28.5
14.30-15.30	619	-19.5
15.30-16.30	580	-58.5
16.30-17.30	605	-33.5
17.30-18.30	571	-67.5
18.30-19.30	665	26.5
19.30-20.30	630	-8.5
20.30-21.30	693	54.5
21.30-22.30	654	-15.5
22.30-23.30	737	98.5

表1: 1968~1970年の全世界の地震に関する、それらの発生時刻(地方時)の頻度分布(Shimshoni [1971]に加筆)。夜中の1時間あたりの地震数は700個を超えている(赤線で囲んだ部分)に対し、日中の地震数は600個前後である(青線で囲んだ部分)

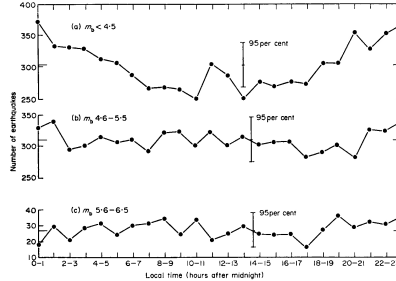


図1: 地震の規模(マグニチュード、図中では $m_b$ )ごとにみた、地震個数の日変化。マグニチュードの小さな地震では、確かに「昼よりも夜に起きやすい」という傾向が見られる(a)が、比較的大きな地震(bおよびc)には、そういう傾向は見られない(Flinn et al. [1972]に加筆)

## 地震検知能力の定量化

- 地震のM別頻度分布は、「Gutenberg-Richter則」と呼ばれ、経験的に**指数分布**に従うことが古くから知られています
- 但し、Mが小さな地震は**完全に検知出来ず**、その取りこぼしゆえに、指数分布からの**ずれ**が見られます
- この点を考慮し、実際に観測されるM別頻度分布(確率分布)を、以下のように表します(図2)

### 真の確率分布(指数分布) x 検知率関数

- 検知率関数は、「あるMにおいて地震が検知される確率」に相当し、過去の研究例に従い、**正規分布の累積密度関数**を用います
- 図3に示す通り、このモデルは**実際のデータによく合う**ことが分かります
- また、正規分布の平均( $\mu$ )は検知率が50%となるMに相当し、このパラメータの大小より、**地震検知能力を定量化**することが出来ます( $\mu$ が小さいほど、検知能力が**よい**)

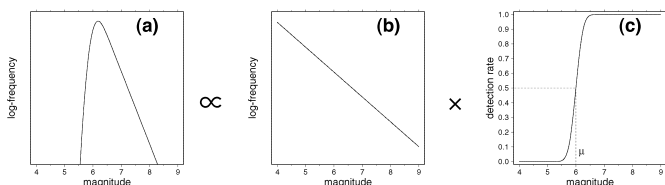


図2: 実際に観測されるMの分布の統計モデル化。Mの真の確率分布である指数分布(b)に、検知率関数に相当する正規分布の累積密度関数(c)を掛けることで、観測されるMの分布(a)を作る(尾形[1991, 統計数理]を改変)。

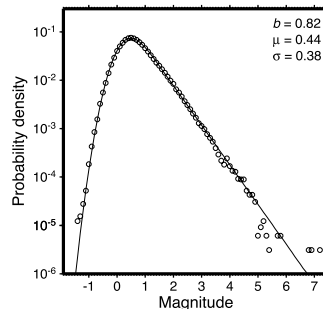


図3: 2006年から2010年の間に日本の内陸・沿岸部で起きた深さ30kmより浅い地震のMの分布(白丸)と、それに対して図2(a)で示した統計モデルを当てはめたもの(実線)。右上隅に示すモデルパラメータの値は最尤法と呼ばれる手法により定めたもの。また、データは気象庁カタログによるもの。

## 地震検知能力の日変化と、それに基づく”completeness magnitude”の推定

- $\mu$ の**時間変化**を推定することで、**地震検知能力の日変化**を求めます
- **柔軟なモデリング**のために、 $\mu$ の時間変化を地震の起きた時刻を節点とする線形スプラインで表します(図4)
- $\mu$ の**時間変化が滑らか**になるような拘束をかけつつ、モデルがデータに合うような**ベイズ推定**を行います
- 今、考えているのは「日変化」なので、解析期間の**始点と終点**である0時と24時も**滑らかにつなげる**拘束(図4中の赤線)を与えます
- 「滑らかさ」の**重み**はABICと呼ばれる**統計的指標**で客観的に定めます
- 図5に、一例として、2009年の日本の内陸・沿岸部の地震を解析して得た $\mu$ の時間変化を示します
- 推定結果は、**昼夜間の顕著な地震検知能力の違い**や、**お昼休みに相当する一時的な地震検知能力の回復**などを定量的に捉えています

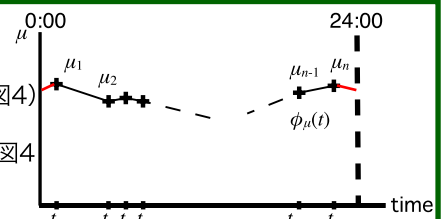


図4:  $\mu$ の時間変化推定の概念図。

- こういった、地震検知能力の時間変化を踏まえた上で、地震が完全に記録されているMの下限(completeness magnitude,  $M_c$ )を地域ごとに調べた結果を図6に示します
- 従来の研究(Nanjo et al.[2010, Bull. Seismol. Soc. Am.]では、日本の内陸全体に対して $M_c = 1.9$ が提案されていましたが、もう少し**大きめの $M_c$** (例えば2.5)を取るべきことが示唆されます
- このような解析を通し、豊富なデータ量を持つ微小地震の取り扱いに**適切な指針**を与え、より**詳細な地震活動解析へ役立てる**ことが出来ます

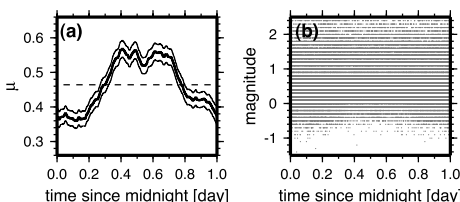


図5: (a)2009年のデータに対して推定された $\mu$ の時間変化(太線)と、その推定誤差(細線、標準偏差の2倍)。点線は、地震検知能力に日変化がないと仮定した場合に得られる $\mu$ の値 (b)これに対応する地震の発生時刻とMのデータ。但し、Mの小さな地震がどのように検知されているかを分かりやすくするために2.5以下のみ示してある。

図6: 地震検知能力の日変化を考慮した上で推定した $M_c$ (ここでは検知率98%のM)の空間分布。2006年から2010年の気象庁カタログを使用。太線は $M_c = 2.0$ に相当。

